METEN IN DE FYSIKA

Dr. J. Kuperus

november 1972

REPRODUKTIE
FYSISCH LABORATORIUM

METEN IN DE FYSIKA

kollege november - december 1972

Dr. J. Kuperus

Inhoud

1.	Het fysisch experiment	2
2.	Algemene overwegingen	3
	2.1 Fysische grootheden	3
	2.2 Kontinue en gekwantiseerde grootheden	4
3.	Dimensies en eenheden	5
4.	Meten is omzetten en vergelijken	7
5.	Responsie	9
6.	Oplossend vermogen	10
7.	Nulmethode en verschilmethode	11
8.	Substitutiemethode	12
9.	Toevalsprocessen	13
10.	Registratie	14
11.	Systematische fouten	15
	11.1 Nulpunt	15
	11.2 IJkfouten	16
	11.3 Hysterese	16
	11.4 Paralax	17
	11.5 Verloop	17
	11.6 De invloed van het meetinstrument	17
	11.7 Het vermijden	18
12.	Keuze van de meetmethode	19

Voorwoord

In dit kollege wordt getracht de beginnende natuurkundestudent een indruk te geven van een aantal aspekten van het experimenteren in de natuurkunde. Er wordt geen systematische behandeling van meetinstrumenten gegeven, doch de algemene principes die ter sprake komen zullen voortdurend worden geïllustreerd met konkrete voorbeelden, die met opzet zo zijn gekozen, dat de kennismaking daarmee op zichzelf reeds van groot belang is.

Het kollege vormt één geheel met de inleidingen die gegeven worden in het kader van het natuurkundepraktikum. De onderwerpen bepaling en verwerking van toevallige fouten, kleinste kwadratenaanpassing, grafieken en rapporteren komen, hoewel ze direkt met het fysisch experiment samenhangen, hier dus niet aan de orde.

De syllabus is zo ingedeeld dat op de linker pagina's steeds de algemene beschouwingen worden gegeven, terwijl rechts voorbeelden en toepassingen zijn geplaatst.

Deze syllabus is werkelijk een samenvatting van het kollege en geen diktaat. De gang van het kollege wordt gevolgd en de daar behandelde onderwerpen worden kort genoemd. Bestudering van het kollege alleen aan de hand van deze syllabus zal dan ook niet wel mogelijk zijn. Een aantal onderwerpen, alsmede de hierboven reeds genoemde, worden behandeld in het boekje 'Fysisch experimenteren' van G.L. Squires (Aula 480); dan wordt hier volstaan met een verwijzing. Van de in Squires gegeven referenties noemen we nog speciaal: Alkemade/Hoogenboom/Smit - Inleiding tot de fysische meetmethoden en Kohlrausch - Praktische Physik; het eerste is geschikt om de gegeven voorbeelden nog eens na te lezen; het tweede is meer een naslagwerk.

Dit kollege is in grote lijnen gelijk aan het kollege dat eind 1971 werd gegeven en dat werd samengesteld met medewerking van prof.dr. J.A. Smit.

1. Het fysisch experiment (indeling in fasen)

Men kan de bezigheden van de experimentele fysikus trachten te rubriceren aan de hand van onderstaand schema. Dit schema is in grote lijnen chronologisch maar in werkelijkheid moeten alle fasen elkaar overlappen. Zo moet de experimentator tijdens de bouw van de meetopstelling vast aan de voorlopige meting denken, tijdens het meten vast enige berekeningen en grafieken maken en gedurende het gehele experiment in de gaten houden wat de moeite waard is om te publiceren.

A. Probleemstelling	Wat wordt er gemeten en waarom? (literatuuronderzoek en theoretische beschouwingen)	
B. Voorbereiding	Keuze meetmethode	nauwkeurigheid (systematische en toevallige fouten) kosten verkrijgbaarheid tijd
	Verkrijgen apparatuur	kopen - lenen ontwerpen en laten konstrueren
	Bouwen opstelling	
C. Meting	Uitproberen en voorlopige metingen	
	Verbeteringen	
	Definitieve metingen	
D. Uitwerken	Analyse en berekeningen	
	Selektie metingen	
	Korrekties	
	Toevallige en systematische fouten (def. bepaling)	
E. Publiceren	Konklusies trekken	
	Selektie resultaten	
	Grafieken en tabellen	
	Figuren	
	Indeling	
	Tekst (niveaubepaling)	

In dit kollege aan de orde komende zaken zullen vallen onder A (fysische grootheden, eenheden) en onder B en C (algemene overwegingen over meetmethoden en systematische fouten).

2. Algemene overweging

2.1 Fysische grootheden

2.1.1 Een fysisch experiment zal vaak de waarde van een bepaalde grootheid, al dan niet in afhankelijkheid van een of meer andere grootheden tot resultaat hebben.

Wordt er een onderling verband tussen grootheden bepaald, dan spreekt men van afhankelijk variabelen en van onafhankelijk variabelen voor respektievelijk de grootheden die als resultaten worden verkregen en de grootheden die door de experimentator worden ingesteld en die dus de omstandigheden van de individuele metingen vastleggen. De onafhankelijk variabelen worden ook wel parameters genoemd. Het kan hierbij gaan om kontinu variabele grootheden, maar ook om grootheden die slechts discrete waarden kunnen aannemen.

Is de uitkomst onafhankelijk van een belangrijke variabele, dan wordt vaak van een konstante gesproken. Al naar gelang het gaat over informatie over een bepaald voorwerp, een bepaald materiaal of een bepaald fysisch verschijnsel, spreekt men van een voorwerps- een materiaal- of een natuurkonstante. De laatste soort noemt men ook wel universele konstanten, d.w.z. konstanten die van geen enkele variabele afhangen.

2.1.2 Het systeem van fysische grootheden is onbeperkt groot. Zo zal immers iedere macht of iedere afgeleide van een bestaande grootheid weer een fysische grootheid zijn. Alleen vaak voorkomende grootheden hebben een naam. Speciaal grootheden die bij verandering van omstandigheden konstant zijn of behouden blijven hebben een naam. Minder vaak gebruikte grootheden worden aangeduid met de manier waarop ze met wel benoemde grootheden samenhangen.

2.1.3 Als algemene eis zal men aan een fysische grootheid willen stellen dat er een meetvoorschrift is te geven waarmee hij bepaald kan worden. Het mag daarbij wel om een zeer indirekte en of moeilijk uitvoerbare meting gaan. Omgekeerd zal men definities moeten kunnen geven in de vorm van een meetvoorschrift.

2.1 Voorbeelden

2.1.1 Een fysisch experiment zou tot resultaat kunnen hebben

- De waarde van de gravitatiekonstante (natuurkonstante)
  $G = 6{,}673 \pm 0{,}003\ 10^{-11}\ Nm^2/kg^2$
- De elektrische weerstand van een bepaald stukje silicium als funktie van de temperatuur. Hierbij is temperatuur onafhankelijk variabele, weerstand afhankelijk variabele.
- De gemiddelde bindingsenergie per nukleon in de atoomkern als funktie van het atoomgetal. De uitkomsten van zeer vele experimenten van zeer uiteenlopende aard zijn hier gekombineerd tot een verband tussen een kontinue afhankelijk variabele en een diskontinue onafhankelijk variabele (atoomgetal).
- Voorwerpskonstante: elektrische weerstand, lengte.
- Materiaalkonstante: soortelijke warmtegeleiding, soortelijke weerstand, massadichtheid.
- Natuurkonstante : konstante van Planck (verhouding tussen energie en frekwentie bij een kwantum elektromagnetische straling).

2.1.2

- plaats, afstand, weg	x	konstant in rusttoestand
- snelheid	dx/dt	konstant bij eenparige beweging
- versnelling	d^2x/dt^2	konstant bij konstante kracht
- verandering van de versnelling per tijdseenheid	d^3x/dt^3	weinig belangrijk, geen eigen naam

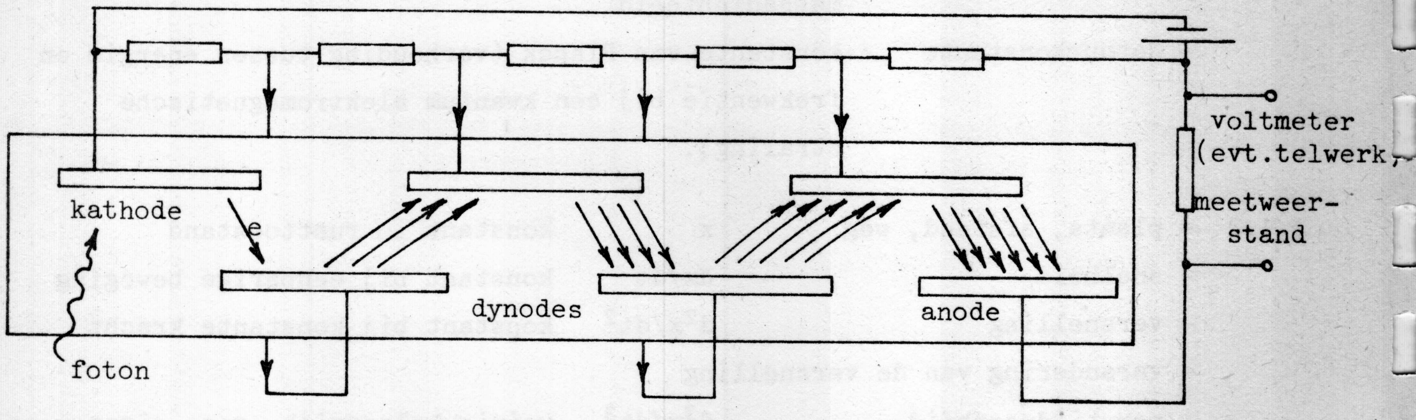
Met eigen naam ook: impuls (behoudswet), energie (behoudswet), massa (behoudswet), druk (in gas plaatsonafhankelijk), temperatuur (in eindtoestand van gesloten systeem plaatsonafhankelijk), zelfinduktie (= stroomonafhankelijke verhouding tussen induktiespanning en tijdsafgeleide van de stroom).

2.1.3 - Temperatuur is gedefinieerd aan de hand van het zg. Carnot kringproces een in de praktijk moeilijk hanteerbare definitie. Op theoretische grond kan men stellen dat ook de (ideale) gasthermometer een goede definitie van temperatuur geeft, een al iets minder onhandige definitie maar nog steeds een onpraktisch instrument.

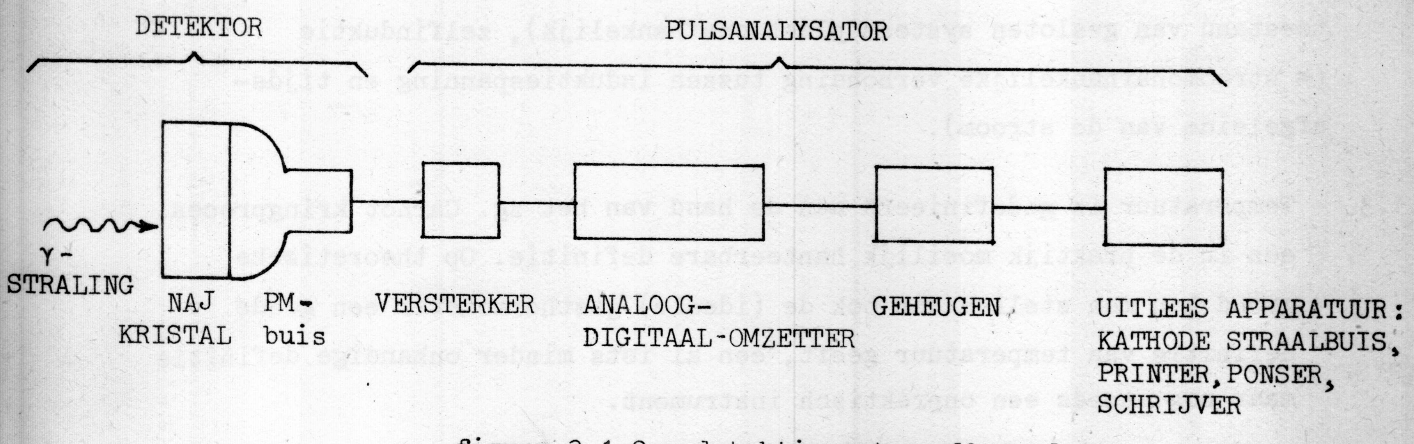
2.2 Kontinue en gekwantiseerde grootheden

Er bestaan grootheden die principieel alleen maar discrete waarden kunnen aannemen en er zijn grootheden die naar hun aard elke waarde kunnen hebben. Onder invloed van het meetproces kunnen deze groepen door elkaar worden gehaald. De meetmethode kan zo ruw zijn dat de kleine eigen diskontinuiteiten van de grootheid verdrinken in de onnauwkeurigheid van het instrument. Omgekeerd zijn er instrumenten die met opzet de aflezing digitaliseren. Mogelijke voordelen kunnen hier zijn grotere afleesnauwkeurigheid of direkte uitvoer voor een computer. Zie ook het gegeven voorbeeld.

De waarnemer die een meetinstrument afleest en het resultaat noteert doet door afronding uiteindelijk hetzelfde.



figuur 3.1.1 Fotomultiplikatorbuis(schematisch)



figuur 3.1.2 γ-detektie met veelkanaals analysator

2.2 Kontinu varierende grootheden:

- de snelheid van een voorwerp
- de kinetische energie van een vrij deeltje
- de golflengte van de elektromagnetische straling, uitgezonden door een zwart lichaam

Gekwantiseerde grootheden:

- de lading van een deeltje
- het impulsmoment van een atoomkern
- het energietransport door een bundel monochromatische alphadeeltjes
- de golflengte van elektromagnetische straling uitgezonden door een atoomkern

Tweeslachtige gevallen:

- De energiestroom behorend bij elektromagnetische straling wordt als kontinu ervaren in het geval van detektie van aanzienlijke hoeveelheden zichtbaar licht, bijvoorbeeld met een CdS detektor. Wordt echter een kleine hoeveelheid zichtbaar licht gedetekteerd met een fotomultiplikatorbuis dan kunnen de fotonen worden geteld. Het kwanteuze karakter van EM straling gaat meer en meer overheersen bij korte golven en hoge frekwenties (gammastraling), het kontinue karakter bij grote golflengtes (radiogolven). Figuur 3.1.1 geeft de bouw van een fotomultiplikatorbuis en de aansluiting daarvan.
- Gammastraling kan onder meer worden gedetekteerd met een NaJ kristal en een multiplikatorbuis. Ieder kwantum wordt hierbij omgezet in een elektrische spanningspuls. De verdelingsfunktie van de grootte van deze pulsen is een kontinue funktie die bepalend is voor de energieën en intensiteiten van de gammastraling. Om deze te bepalen wordt het spanningsgebied waarbinnen deze pulsen voorkomen verdeeld in bijvoorbeeld 400 kleine intervallen. Elektronisch wordt uitgemaakt in welk interval een binnenkomende puls behoort, waarna een daarbij behorend telwerk één eenheid wordt verhoogd. De verdelingsfunktie verschijnt in digitale vorm als de stand van deze telwerken (figuur 3.1.2).

3. Dimensies en eenheden

3.1 Dimensies

Twee grootheden worden van dezelfde dimensie genoemd als ze direkt met elkaar kunnen worden vergeleken (groter, kleiner dan). Voorts is het produkt (quotiënt)van de dimensies de dimensie van het produkt(quotiënt). Een integraal geldt hierbij als een produkt, een afgeleide als een quotiënt. De eerst genoemde regel heeft tot gevolg dat bij een som of verschil alleen grootheden van dezelfde dimensie mogen voorkomen. Het betekent ook dat bij alle funkties die in een machtreeks met meer dan een term kunnen worden ontwikkeld zowel argument als funktie dimensieloos moeten zijn.

Om voor alle fysische grootheden de dimensie de definiëren dient men uit te gaan van een stel grondgrootheden, daarvan de dimensie een naam te geven en vervolgens uit definities en wetten de dimensies van andere grootheden af te leiden.

In de praktijk gebruikt men het begrip dimensie vooral voor de kontrole van mogelijke fouten in formules (Squires 12.8). Een dimensiebeschouwing kan in sommige gevallen, afgezien van konstante voorfaktoren, tot theoretische voorspellingen leiden.

Men geeft dimensie aan met vierkante haken om het symbool voor de grootheid.

3.1 en 3.2

grootheid	dimensie *	eenheid in SI
diameter	$[l]$	m
frekwentie	$[t^{-1}]$	s^{-1} = Hz
energie	$[ml^2t^{-2}]$	J = kg m^2/s^2
hoek	-	radiaal
ruimtehoek	-	steradiaal
soortelijke weerstand	$[m\,l^3 i^{-2} t^{-3}]$	Ωm
brekingsindex	-	-
konstante van Boltzmann	$[m\,l^2 t^{-2} T^{-1}]$	J K^{-1}
viskositeit	$[m\,l^{-1} t^{-1}]$	kg m^{-1} s^{-1} (= 10 poise)

*bij grondgrootheden lengte l , tijd t , massa m , stroomsterkte i , temperatuur T .

Dimensiekontrole:

- Uitdrukking (4.31) uit Squires: de fout in de richtingskoëfficiënt bij een lineaire kleinste kwadratenaanpassing. Meetpunten x_i en y_i (x en y verschillende dimensie), aanpassing y = mx + c

  $\Delta m = \left(\frac{1}{D}\ \frac{\Sigma d_i^2}{n-2}\right)^{\frac{1}{2}}$; $D = \Sigma(x_i - \bar{x})^2$; $d_i = y_i - mx_i - c$

  $[y] = [mx] = [c] \rightarrow [m] = [y][x^{-1}]$; $[\Delta m] = [m]$

  dus dimensie links is $[y\ x^{-1}]$.

  $[D] = [x^2]$; $[d] = [y]$; $[n] = [2] = o$

  dimensie rechts is $[(x^{-2}\ y^2)^{\frac{1}{2}}] = [y\ x^{-1}]$ klopt. Merk op dat een eenhedenkontrole hier niet mogelijk is. De eenheden van x en y zijn immers niet bekend.

- Dimensies in de wet van Stokes voor een bol met straal r die met snelheid v door een vloeistof beweegt. We verwachten dat de wrijvingskracht F_w afhangt van r, v en de viskositeit η. Veronderstel: $F_w \sim r^\alpha\ v^\beta\ \eta^\gamma$

  Dimensies: $[m\ l\ t^{-2}] = [l^\alpha (lt^{-1})^\beta\ (ml^{-1}\ t^{-1})^\gamma]$

  $$\left.\begin{array}{ll} \text{geeft voor m :} & 1 = \gamma \\ \text{voor l :} & 1 = \alpha + \beta - \gamma \\ \text{voor t :} & -2 = -\beta - \gamma \end{array}\right\} \quad \alpha = \beta = \gamma = 1$$

  Een volledige afleiding geeft $F_w = 6\pi\ r\eta v$

3.2 Eenheden

De waarde van een fysische grootheid is gelijk aan het produkt van een getal en de eenheid waarin die grootheid wordt uitgedrukt. Uiteraard zijn beide faktoren in dit produkt van gelijk belang en moeten bij het opgeven van een grootheid dus ook beide worden vermeld. Om een stelsel van eenheden te definiëren zal men eerst een volledig stelsel van grondeenheden moeten kiezen. Vervolgens zal men de eenheden voor die grootheden afzonderlijk vastleggen aan de hand van een nauwkeurig gedefinieerde, onveranderlijke en gemakkelijk reproduceerbare standaard. Tenslotte zal men de eenheden voor afgeleide grootheden zo kiezen dat in de relaties tussen de verschillende grootheden zo weinig mogelijk getalfaktoren voorkomen.

Tegenwoordig is bijna algemeen in gebruik het zg. Système International d'Unités (SI); zie verder Squires app. F.

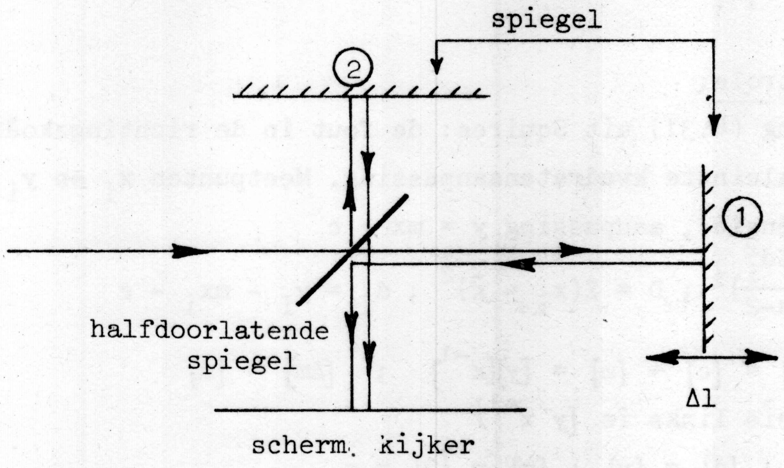


Fig. 3.2.1 Michelson interferometer

3.2

- Afstand Amsterdam-Utrecht = 38 km = 38 10^3m = 38 10^{18}fm.
- Konstante van Planck = 6,63 10^{-34}Js = 4,15 10^{-15} eVs.
- Gaskonstante R_o = 8 314 J $K^{-1}kmol^{-1}$ = 8,314 J $K^{-1}mol^{-1}$.

Grondeenheden

- Lengte.

De meter is gedefinieerd aan de hand van een golflengte in het zichtbare lichtgebied. Een instrument, waarmee een lengte van deze orde kan worden omgezet in een direkt meetbare lengte is de Michelson interferometer (figuur 3.2.1). Verplaatsing van spiegel ① over afstand Δl heeft het passeren van een aantal (n) interferentiestrepen tot gevolg. Bij bekende golflengte λ is $\Delta l = n\lambda$.

- Temperatuur

Om bij temperatuurvergelijkingen niet afhankelijk te zijn van de nogal onhandige gasthermometer heeft men ingevoerd de zg. praktische temperatuurschaal, waarmee 11 temperaturen vanaf 13,81 K (tripelpunt van waterstof) tot 1337,58 K (stolpunt goud) vastgelegd worden. Tussen deze punten worden interpolatievoorschriften gegeven met behulp van een weerstandsthermometer en van een thermo-element. Erboven wordt geëxtrapoleerd met behulp van de stralingswet van Planck (stralingspyrometer).

- Elektrische stroomsterkte

De definitie van de ampère legt in de uitdrukking voor de magnetische aantrekking tussen twee lange stroomdraden in vakuum een betrekkelijk eenvoudige voorfaktor vast. Omdat deze faktor direkt samenhangt met de voorfaktor in de wet van Coulomb ligt deze ook vast maar heeft een minder eenvoudige waarde. De wetten luiden resp.:

$F_{magn} = 2.10^{-7}\ i_1\ i_2/r$ $\quad F_{el} = 10^{-7}\ c^2\ Q_1Q_2/r^2$ $\quad$ (c = lichtsnelheid)

Om veel belangrijker wetten in het elektromagnetisme vrij te krijgen van getalfaktoren (bijv. $V_{ind} = - d\phi/dt$) voert men in de juist gegeven uitdrukkingen nog extra faktoren in: $F_{magn} = \mu_o\ i_1\ i_2/2\pi r$ met $\mu_o = 4\pi\ 10^{-7}$ H/m

$F_{el} = Q_1\ Q_2/4\pi\varepsilon r^2$ met $\varepsilon_o = (4\pi\ 10^{-7}c^2)^{-1}$F/m = 8,85 10^{-12}F/m. (rationalisatie).

Afgeleide eenheden

- hoek: radiaal liever dan graad; dan is cirkelbooglengte = hoek maal straal zonder extra faktor $2\pi/360$.
- kracht: Newton zo gekozen dat F = ma.
- energie: Joule zo gekozen dat W = F s daardoor is echter $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$.
  De elektronvolt (niet SI) zo gekozen dat W = Q V als Q wordt uitgedrukt in elementairladingen en V in volt.

4. Meten is omzetten en vergelijken

4.1 Het meten van een grootheid komt neer op het vergelijken van die grootheid met de bijbehorende eenheid. Dat is feitelijk het afpassen van de eenheid of van frakties daarvan op de te meten grootheid, eventueel gevolgd door interpolatie.

Een meetinstrument heeft tot taak de te meten grootheid I, meestal via een aantal tussenstappen, om te zetten in een direkt waarneembare grootheid U. Daarnaast zal een meetinstrument de bovengenoemde afpasprocedure min of meer automatiseren (eenvoudigste vorm van automatisatie is wijzer over schaalverdeling). De ijking van het instrument is de bepaling van de funktie U(I).

4.2 Tussen U en I liggen meestal een hele reeks tussenstappen. Dit kunnen werkelijke omzettingen zijn van de ene grootheid naar een andere, of alleen maar tussen-stappen die tot doel hebben de te meten grootheid te versterken of te verzwakken. Speciaal elektrische grootheden spelen hierbij een belangrijke rol. Hierbij is immers versterking of verzwakking maar ook transport naar de plaats van de waarnemer betrekkelijk eenvoudig.

Over het algemeen zal men de voorkeur geven aan lineaire omzettingen. Het meetinstrument is dan over het gehele gebruiksgebied met eenzelfde absolute nauwkeurigheid af te lezen, terwijl interpolatie eenvoudig is. Moet het instrument over een zeer groot gebied gebruikt worden, dan is een logarithmische schaal aantrekkelijk. Een konstante fout in U geeft een konstante relatieve fout in I. Instrumenten die voor positief en negatief signaal eenzelfde aanwijzing moeten geven, zullen in de omgeving van het nulpunt haast steeds alineair zijn.

De eigenschappen van een meetinstrument worden bepaald door het samenspel van de eigenschappen van alle in het instrument voorkomende omzettingen.

4.1 - Massabepaling met de jukbalans

Hoewel moderne balansen veelal met een kompensatiemethode (zie par. 8) werken, komt ook de gewone jukbalans nog veel voor. Hier hebben we een heel duidelijk voorbeeld van afpassen van eenheden van massa op te meten massa. De uitslag van het juk kan worden gebruikt als interpolatie indikator.

4.2 Lineaire omzetting

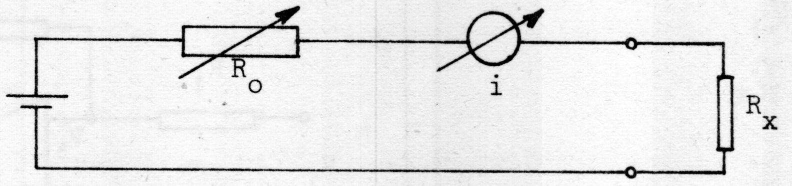
- Spanningsmeting met draaispoelmeter:
  spanning → stroom → kracht → krachtmoment → uitslag
- Tijd met balansuurwerk. Konstante hoeksnelheid van de wijzer legt evenredigheid tussen hoek en tijd.
- Meten van de energiestroom in een lichtbundel met behulp van een thermozuil:
  vermogen → temperatuurstijging → elektrische spanning → elektrische stroom → krachtmoment op draaispoel → verplaatsing

Alineaire omzetting

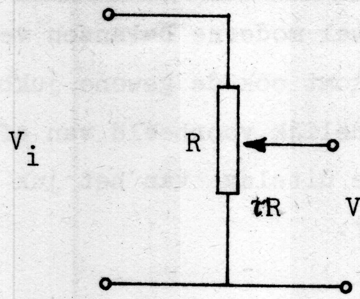
- Weerstandsmeting met een universeel meter (figuur 4.2.1)

$$U \sim i \sim \frac{V_o}{R_o + R_x}$$

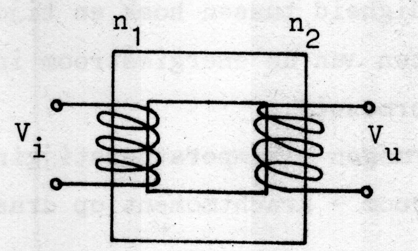
- De bepaling van de energie van een geladen kerndeeltje m.b.v. de stroomsterkte door de spoelen van een elektromagneet die dit deeltje een voorgeschreven cirkelbaan laat doorlopen:
  energie → impuls → magnetische induktie B → spoelstroom → krachtmoment → verplaatsing
  Alleen de stap energie → impuls is alineair.



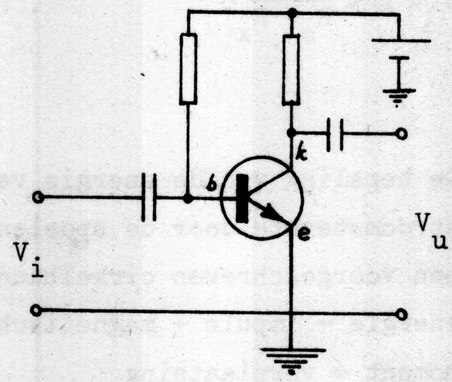
figuur 4.2.1



figuur 4.2.2 potentiometer

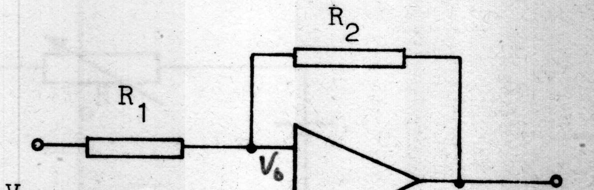


figuur 4.2.3 transformator



figuur 4.2.4 transistor

$$V_u = AV_0$$
$$V_0 - V_i = IR_1$$
$$V_u - V_0 = IR_2$$



figuur 4.2.5 tegengekoppelde operationele versterker

Elektrische spanningssignalen

- Verzwakking van een signaal met een potentiometerschakeling (figuur 4.2.2)

  Het te verzwakken signaal wordt aangesloten over een weerstand R. Het verzwakte signaal wordt afgenomen over een gedeelte τR van die weerstand. Hierbij is dus in onbelaste toestand $V_u = \tau V_i$. De inwendige weerstand (uitgangsimpedantie), gedefinieerd als $\Delta V_u / \Delta i_u$ neemt door deze schakeling toe met $\tau(1 - \tau)R$. (N.B. een potentiometer is geen meter.)

- Omzetting van wisselspanningen met een transformator

  Twee spoelen met windingsaantallen n_1 en n_2 zijn gewikkeld om een gemeenschappelijke ijzerkern. In eerste benadering geldt voor de wisselspanningen $V_u/V_i = n_2/n_1$ terwijl $i_u/i_1 = n_1/n_2$. Het getransporteerde vermogen wordt dus niet veranderd. (figuur 4.2.3)

- Versterking door een transistor

  Een transistor is een halfgeleidend element met drie aansluitingen, resp. emitter, basis en kollektor genoemd. Figuur 4.2.4 geeft de transistor in de zg. gemeenschappelijke emitter schakeling, d.w.z. in- en uitgangssignaal hebben de emitter als gemeenschappelijke pool. Een kleine verandering van de basisstroom, veroorzaakt een grote verandering van de kollektorstroom, d.w.z. een kleine V_i zal een grote V_u veroorzaken. Wanneer het over korte signalen gaat zal bij basis en kollektor een kondensator zijn opgenomen om de gelijkspanningsinstelling van de transistor niet op het signaal gesuperponeerd te krijgen.

- Operationele versterker met tegenkoppeling

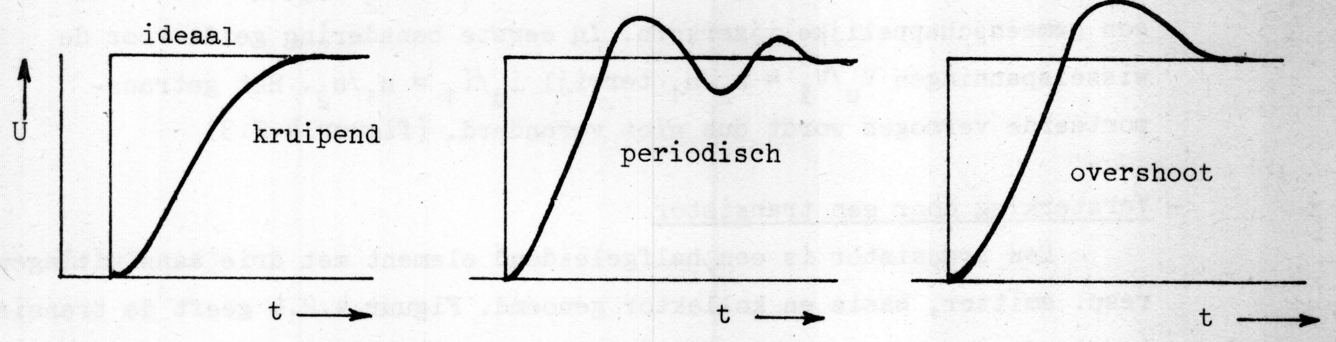
  Een operationele versterker is een versterker waarvan de versterkingsfaktor zeer groot is, terwijl de ingangsstroom verwaarloosd kan worden. Dit betekent dat de versterker zonder meer niet te gebruiken is omdat bij een gering ingangssignaal de uitgang al verzadigd zou zijn. Figuur 4.2.5 geeft de versterker in tegengekoppelde toestand.

Hier geldt $V_u/V_i = +\frac{R_2}{R_1} \left\{ \frac{1}{-1 + \frac{1}{A}\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)} \right\} \simeq -R_2/R_1$

Zie voor de voordelen van tegenkoppeling Squires 6.7.

5. Responsie

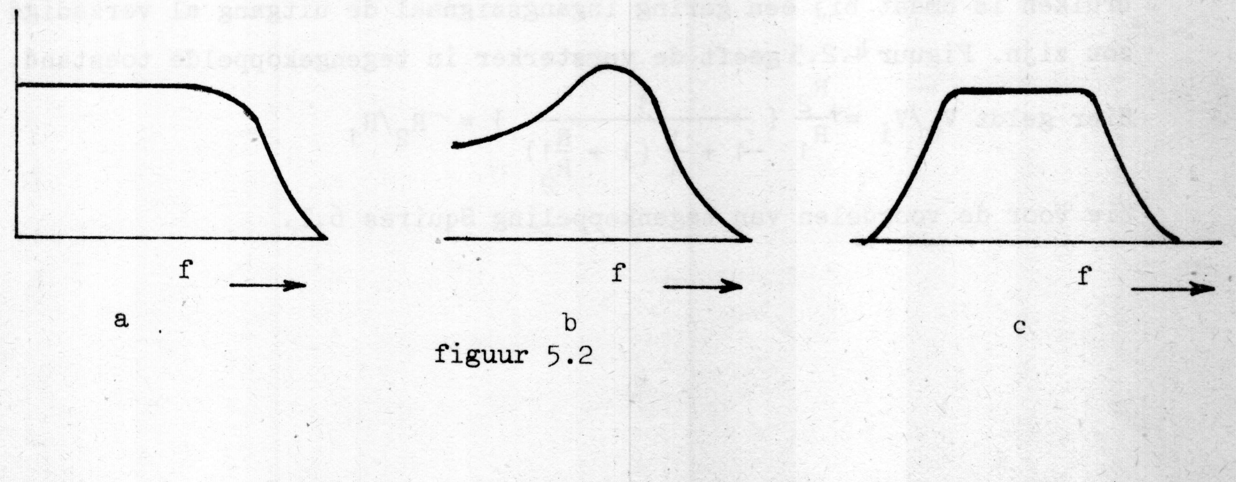
Als het signaal I een funktie van de tijd t is zou men wensen dat U eenzelfde funktie van de tijd is. In werkelijkheid zal dit meestal niet het geval zijn. Het gedrag van het instrument zal beinvloed worden door de tijdsafhankelijkheid van I. Hoe dit gedrag precies is, wordt bepaald door de differentiaalvergelijkingen die de reaktie van het meetsysteem beschrijven. Een manier om dit gedrag te beoordelen is voor I(t) een sprongfunktie te gebruiken. In figuur 5.1 zijn enige veelvoorkomende responsies hierop geschetst.



figuur 5.1

Men definieert in zo'n geval wel de responsietijd als de tijd waarna het instrument niet meer dan 10% van de sprong van de eindwaarde afwijkt.

Men kan de eigenschappen van een meetsysteem ook onderzoeken door voor I een sinusvormig varierend signaal te gebruiken. Het gedrag van U als funktie van de frekwentie f daarvan noemen we de frekwentiekarakteristiek van het instrument. Vaak zal men een vorm als geschetst in figuur 5.2 a kunnen verwachten. Instrumenten die speciaal bedoeld zijn om wisselsignalen te verwerken zullen de gedaante van figuur c vertonen. Heeft een instrument een eigen frekwentie (resonantie) dan kan men figuur b verwachten.



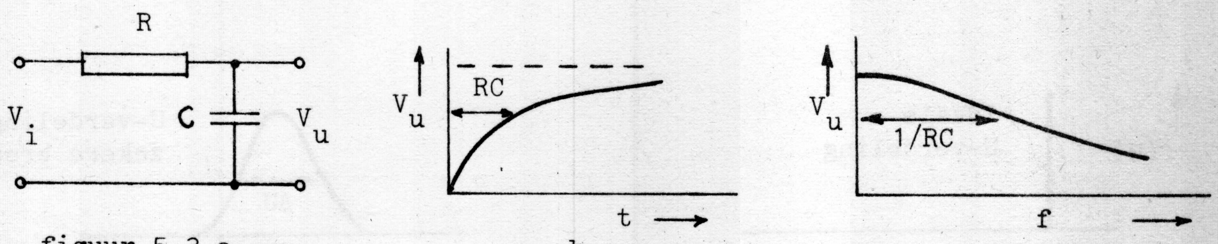
figuur 5.2

5. - Temperatuurmeting

Vergelijk een kwikthermometer met een thermoelement in een temperatuurgebied waar beiden bruikbaar zijn. De kwikthermometer heeft een kwikreservoir (warmtekapaciteit) en een glaslaag (warmteweerstand). De kombinatie van deze twee faktoren veroorzaakt een zekere traagheid. Bij het thermoelement zijn zowel warmteweerstand als -kapaciteit aanzienlijk lager, hetgeen resulteert in een veel kortere responsietijd. De bezwaren van het thermoelement zijn gelegen in de gevoelige spanningsmeting die nodig is en de noodzaak van een referentietemperatuur.

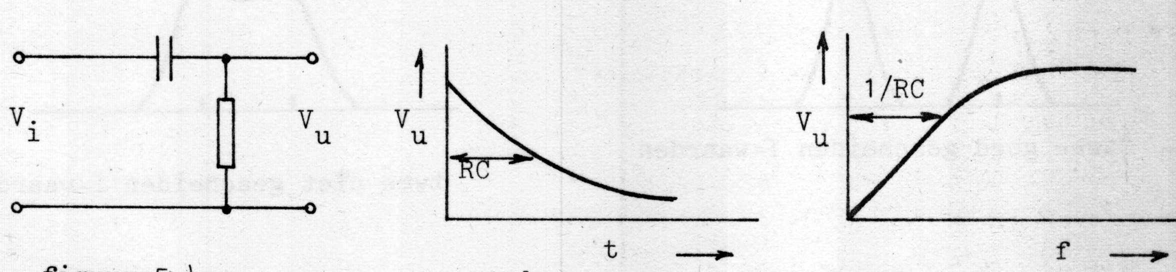
- De RC-kombinatie bij een elektrische spanning

In veel schakelingen zal men hetzij als storend bijeffekt hetzij bewust aangebracht een RC-kombinatie als in figuur 5.3 a aantreffen. Figuur b geeft de responsie op een sprongfunktie.De tijd totdat (1 - 1/e) maal de signaalverandering overbrugd is bedraagt RC. Het 90%-punt is na 2,3 maal RC bereikt. Figuur c geeft globaal de frekwentiekarakteristiek.



figuur 5.3.a   b   c

Lage frekwenties worden onderdrukt door de schakeling van figuur 5.4.a Sprongresponsie en frekwentiekarakteristiek zijn in de b en c figuur gegeven. Met een dergelijke schakeling kan men een gelijkspanningsniveau veranderen, waarbij RC dan groot moet zijn ten opzichte van de signaalduur.



figuur 5.4.a   b   c

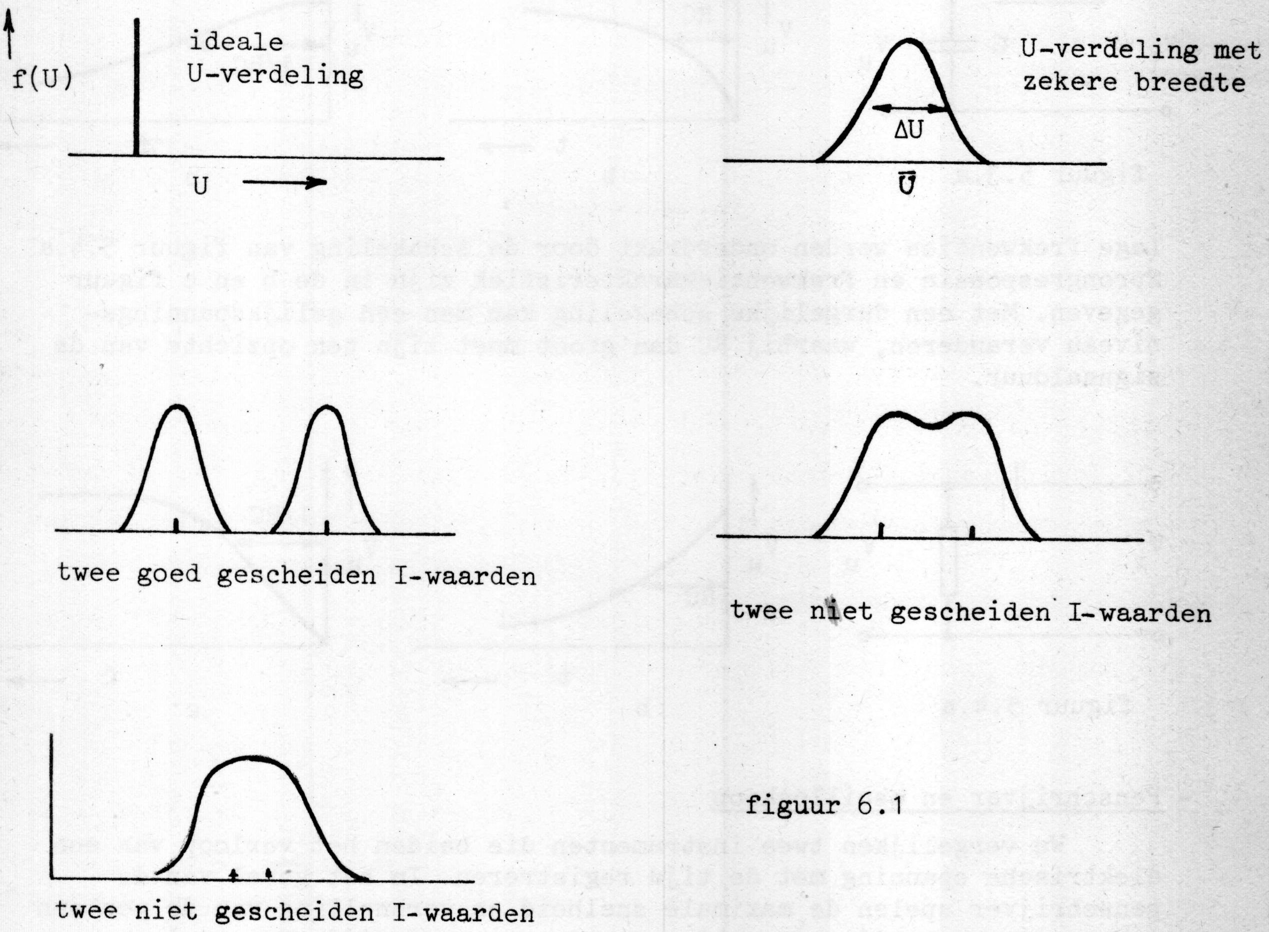
- Penschrijver en oscilloskoop

We vergelijken twee instrumenten die beiden het verloop van een elektrische spanning met de tijd registreren. In het geval van de penschrijver spelen de maximale snelheid en versnelling van de pen een belangrijke rol bij de bepaling van de responsietijd. Een typische snelheid is 0,5 m/s en een versnelling 2,5 m/s^2. Bij een papierbreedte van 25 cm levert dit responsietijden in de orde van 0,5 s.

De oscilloskoop is ontworpen voor veel snellere variaties. Het frekwentiebereik wordt meestal beperkt door het versterker gedeelte. Een principiële bovengrens vinden we in de looptijd van de elektronen tussen de afbuigplaten (bij versnelspanning 1000 V en plaatlengte 1 cm is dit in de orde van 1 ns).

6. Oplossend vermogen

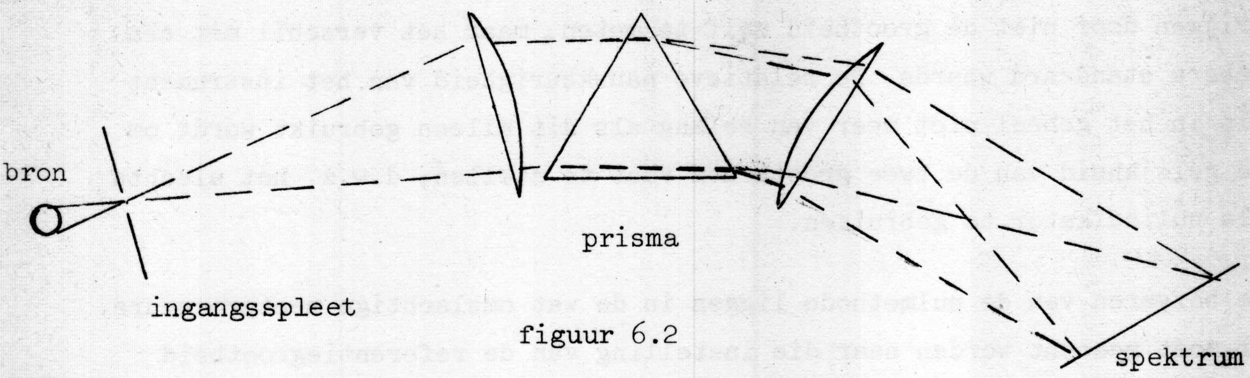
Het oplossend vermogen van een instrument (ook wel het scheidend vermogen genoemd) is de verhouding tussen het te meten signaal I en de kleinste variatie daarin die nog kan worden waargenomen (ΔI). Het feit dat een dergelijke kleinste variatie bestaat is een gevolg van het niet volledig eenduidig zijn van de funktie U. Bij een vaste waarde van I hoort een zekere verdeling van U waarden. Bij een lineair instrument is het scheidend vermogen dus ook gelijk aan $\overline{U}/\Delta U$ (gemiddelde U gedeeld door breedte van de U-verdeling). Anders moet ΔU eerst omgerekend naar ΔI. Figuur 6.1 geeft enkele karakteristieke gevallen.



figuur 6.1

6. De prisma-spektrograaf en monochromator

Met het in figuur 6.2 schematisch getekende apparaat kan men de spektrale samenstelling van het door de lichtbron L uitgezonden licht onderzoeken.

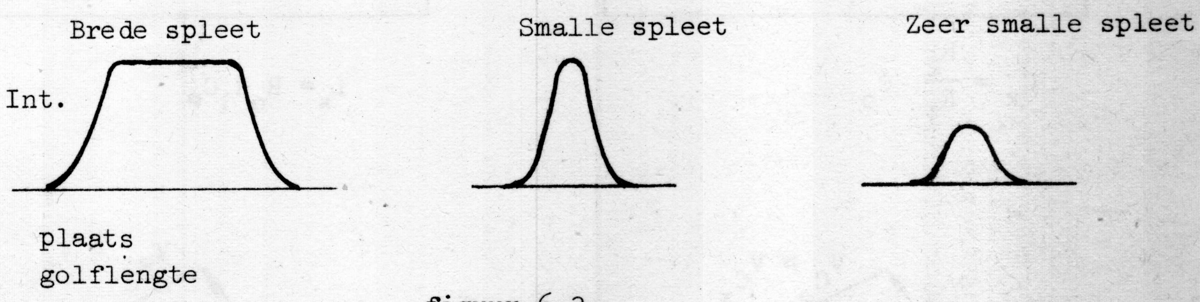


figuur 6.2

In geval van een bron die volledig monochromatisch licht uitzendt, verschijnt op het scherm S een lijn met eindige breedte; de afbeelding van de ingangsspleet.

De plaats op het scherm waar de spleetafbeelding verschijnt hangt af van de golflengte van het licht. Hier wordt golflengte (I) dus omgezet in afstand (U). De breedte van de waargenomen lijn wordt bepaald door de breedte van de spleet, onregelmatigheden in afbeeldende lenzen en buiging van het licht aan het prisma. Figuur 6.3 geeft het intensiteitsverloop als funktie van de plaats op het scherm bij brede, smalle en zeer smalle spleet. Merk op dat vanaf een zeker punt verkleining van de spleet geen verbetering van het oplossend vermogen meer geeft. Het oplossend vermogen ($\lambda/\Delta\lambda$) dat in de laatste gevallen wordt bereikt, ligt in de orde van 5000.

Wordt op de plaats van het spektrum een uitgangsspleet opgenomen, dan kan het instrument als monochromator worden toegepast.

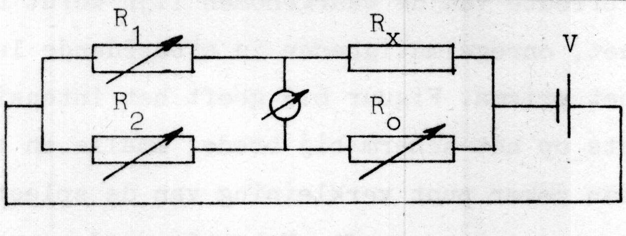


figuur 6.3

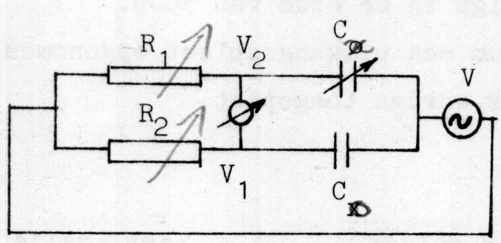
7. <u>Nulmethode en verschilmethode</u>

7.1 Vele meetmethoden hebben over hun gehele meetgebied een zekere konstante relatieve fout. De absolute fout neemt dus toe naarmate de te meten waarde groter is. Hierbij kan men een belangrijke winst aan nauwkeurigheid verkrijgen door niet de grootheid zelf te meten, maar het verschil met een zekere standaard waarde. De relatieve nauwkeurigheid van het instrument is in het geheel niet meer van belang als dit alleen gebruikt wordt om de gelijkheid van de twee grootheden vast te stellen, d.w.z. het slechts als nulindikator te gebruiken.

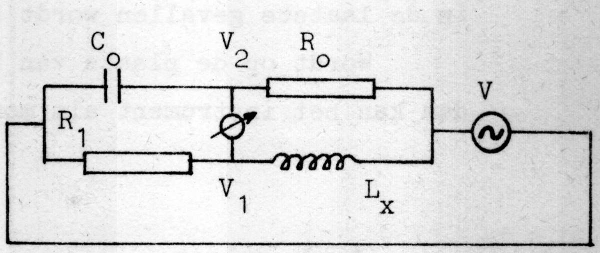
De bezwaren van de nulmethode liggen in de wat omslachtige meetprocedure. Er moet gezocht worden naar die instelling van de referentiegrootheid waar de nuldetektor geen uitslag heeft. Om deze laatste niet te beschadigen of om in een afleesbaar gebied daarvan te komen moet dit vaak nog stapsgewijs. Automatisering is wel mogelijk. De verschilmethode heeft dit bezwaar in mindere mate, doch heeft bij een instelling van de referentiegrootheid slechts een klein gebied van toegelaten variaties voor de te meten grootheid. Het voordeel ligt natuurlijk in de grote winst in de nauwkeurigheid.



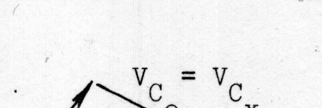
figuur 7.1

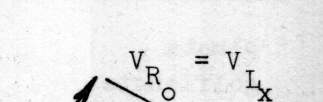


$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_o$$



$$L_x = R_o R_1 C_o$$





fasediagrammen bij evenwicht

Wienbrug

Maxwellbrug

figuur 7.2

7. Brugschakeling

- Weerstandsmeting kan direkt gebeuren via stroommeting. De afleesnauwkeurigheid is door de alineaire schaal beperkt. Ook veranderingen in de batterijspanning bij belasting met de weerstand benadelen de meetnauwkeurigheid. De bij een universeelmeter opgegeven nauwkeurigheid is meestal in de orde van 5%.

  Bij de brug van Wheatstone wordt de onbekende weerstand R_x gekombineerd met drie andere bekende weerstanden (figuur 7.1). Geeft de nuldetektor geen uitslag, dan is $R_x = R_o R_1/R_2$. Wordt er met weerstandsbanken gewerkt, dan vindt men een zo groot mogelijk instelnauwkeurigheid door te zorgen dat alle dekaden worden gebruikt. In de omgeving van de nuldoorgang is de stroom door de detektor evenredig met $R_x - R_o R_1/R_2$, waarbij de evenredigheidsfaktor afhangt van V, R_o, R_1, R_2 en $R_{detektor}$.

- Rekmeting

  Rekstrookjes zijn dubbele stukjes papier, waartussen zich een heen en weer gaand weerstandsdraadje bevindt. Plakt men de strookjes op een materiaal, dan zal een plaatselijke vervorming van het materiaal de lengte van de draadjes beinvloeden en daardoor een kleine weerstandsverandering introduceren. Deze is zo klein dat hij alleen via een brugschakeling gemeten kan worden. De nuldetektor kan direkt in mikro-rek geijkt worden (1 mikro-rek = relatieve lengteverandering van 10^{-6}).

- Kapaciteit en zelfinduktie (Maxwell-Wienburg)

  In figuur 7.2 zijn twee brugschakelingen getekend waarmee respektievelijk kapaciteit en zelfinduktie kunnen worden bepaald. Door de nuldetektor wordt zowel fase als grootte van de twee wisselspanningssignalen V_1 en V_2 vergeleken. Bij de kapaciteitsbrug wordt de faseverschuiving die voor C_x in de ene tak wordt geintroduceerd met behulp van C_o in de andere tak opgewekt. In de zelfinduktiemeting wordt door L_x een faseverschuiving veroorzaakt die eveneens m.b.v. C_o wordt gekompenseerd. Omdat een zelfinduktie altijd nog een eigen weerstand heeft, zal parallel aan C_o meestal een regelbare weerstand moeten worden geschakeld.

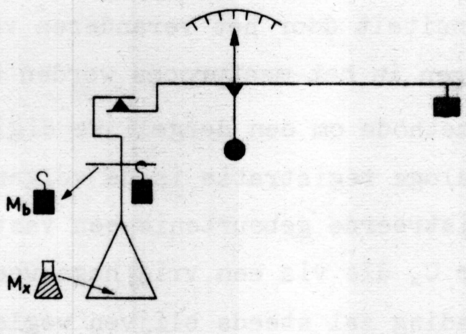
8. Substitutiemethode

Een nulmethode vergelijkt op hetzelfde tijdstip twee grootheden die op verschillende plaatsen in de meetopstelling voorkomen. Men kan echter ook op verschillende tijden twee grootheden vergelijken die op dezelfde plaats in de meetopstelling worden opgenomen; een zg. substitutiemethode. Om de vergelijking uit te voeren moet men beschikken over een met grote precisie afleesbare, nauwkeurig reproducerende, maar niet noodzakelijk geijkte indikatie van de betreffende grootheid. Men leest deze indikatie eerst af met de te meten grootheid en vervolgens regelt men een referentiegrootheid zo af dat dezelfde aflezing van de indikatie wordt verkregen.
Ook de in 3.3 besproken brugschakeling is een geschikte indikator.

De kracht van de substitutiemethode ligt hem in het onmiddellijk herhalen van de meting met een bekende grootheid, een zeer effektieve methode om allerlei systematische fouten te elimineren. Men ijkt als het ware iedere keer bij iedere meting.
De meetmethode is natuurlijk nogal omslachtig. Behalve het afregelen van de referentiegrootheid moet men ook nog de 'aansluitingen' van meetgrootheid en referentie vervangen.

8. - Weging

Veel moderne balansen werken volgens het substitutie principe. Voordat het te wegen voorwerp is aangebracht verkeert het juk in evenwicht. Aan de ene zijde hangt een vast gewicht, aan de andere zijde een hele serie geijkte gewichten. Aan deze laatste zijde wordt het te wegen voorwerp toegevoegd waarna veelal met een knoppen en hefbomensysteem zoveel gewichten worden weggenomen dat weer evenwicht ontstaat of een kleine direkt afleesbare afwijking daarvan. Het grote voordeel van dit systeem ligt nu in het wegvallen van de rol die de armlengtes spelen.



figuur 8.1
substitutie balans

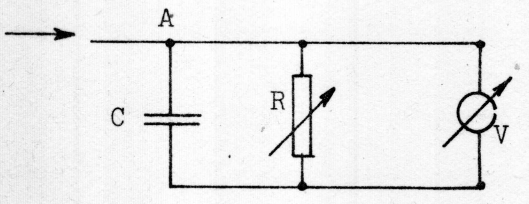
- Weerstandsmeting

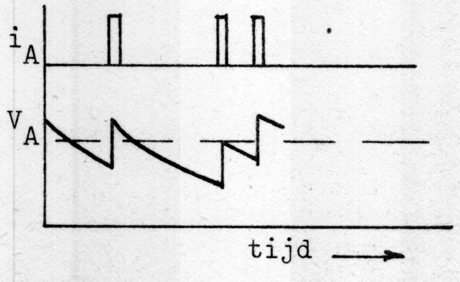
In een brug van Wheatstone (7.1) kan men de onbekende weerstand vervangen door een goed geijkte weerstandsbank. Afregeling tot de nuldetektor geen uitslag vertoont geeft het meetresultaat, zonder dat fouten in de drie brugweerstanden een rol spelen. Bovendien zullen alle effekten die verschillend zijn in R_o en R_x (thermospanning, kontaktpotentialen) geen rol meer spelen.

9. Toevalsprocessen (Squires app. D2 p. 232).

Vele metingen, vooral in atoom- en kernfysika, komen neer op het tellen van gebeurtenissen die volledig volgens een toevalsproces plaats vinden. D.w.z. dat de kans dat zo'n gebeurtenis plaats vindt in een bepaald tijdsinterval een bepaalde waarde heeft. Een meting bestaat dus uit het tellen van het aantal gebeurtenissen in een zekere periode. Zo'n telling geeft dan een waarde voor het gemiddeld aantal gebeurtenissen per tijdseenheid. De verdeling van waarnemingen zal voldoen aan de zg. Poisson-stochastiek. De beste schatting voor de relatieve fout daarvoor wordt gegeven door $1/\sqrt{n}$, als n de getelde gebeurtenissen zijn. Door langer te tellen kan men de nauwkeurigheid dus verhogen. (100 geteld: 10% fout; 10.000 geteld: 1% fout). Een bezwaar van dit soort metingen is dat men pas na afloop van een zekere periode het resultaat waarneemt. Het snel opzoeken van een piek in de intensiteit door het veranderen van voorwaarden is dan moeilijk. Ook storingen in het meetproces worden slecht opgemerkt.

Een methode om een dergelijke digitale grootheid toch waar te nemen met een analoge registratie is de volgende (fig. 9.1). Men voert (automatisch) voor elke geregistreerde gebeurtenis een vaste hoeveelheid lading toe aan een kondensator C, die via een vrij hoge weerstand R is kort gesloten. De toegevoerde lading zal steeds blijven weglekken met het gevolg dat de spanning over de kondensator een soort evenwichtswaarde tussen aanvoer en afvoer gaat aannemen. De weliswaar enigszins fluktuerende waarde die een spanningsmeter hiervoor aangeeft is een kontinue en analoge indikatie voor het gemiddelde aantal gebeurtenissen per tijdseenheid. Naarmate dit aantal lager ligt zullen de fluktuaties groter zijn en zal men de spanningsmeter gevoeliger moeten zetten. Men kan de aanwijzing van de meter opvatten als een maat voor het aantal gebeurtenissen n dat gedurende een voorafgaande periode RC heeft plaats gehad. De fluktuaties zullen dus weer, relatief gezien, van de orde van $\frac{1}{\sqrt{n}}$ zijn. Men kan de grootte van de fluktuaties dus minder maken door een grotere R of C te gebruiken. Dit maakt de aanwijzing echter aanzienlijk trager, d.w.z. de responsietijd groter.





figuur 9.1

9. De meting van de werkzame doorsnede σ van een bepaalde kernreaktie A(a,b)B is een telling van het aantal geregistreerde b-deeltjes bij bombardement van een plaatje A-kernen met a-deeltjes.

Het getelde aantal n_b in een periode t is gelijk aan

$$n_b = \sigma N d n_a \rho \Omega/4\pi$$

waarbij n_a het in diezelfde periode t op het plaatje aangekomen aantal deeltjes a is, d de dikte van het plaatje, N het aantal kernen per volume-eenheid op dit plaatje, ρ het rendement van de detektor en Ω de ruimtehoek waaronder het trefplaatje de detektor ziet.

De bepaling van σ vraagt dus kennis van n_b, N, (te verkrijgen uit de massa, het volume van het plaatje en het getal van Avogadro), d de dikte van het plaatje, n_a (bij geladen deeltjes te bepalen door de lading te meten, het digitale karakter wordt bij grote na niet waargenomen) en voorts van de detektorgrootheden Ω en ρ. De nauwkeurigheid wordt ondermeer bepaald door de fout in n_b. Door dus n_a groot te maken (lang schieten) of door de detektorgrootheden gunstig te kiezen, zal men tot een nauwkeurige waarde van σ kunnen komen. Omdat σ vaak afhangt van de energie van het deeltje, is het niet verstandig d groot te nemen. Door afremming zullen dan a-deeltjes van verschillende energieñ in het plaatje aanwezig zijn. Dit smeert eventueel variatie met de energie dus uit (afname scheidend vermogen).
In de bovenstaande uitdrukking is wel verondersteld dat de uitkomende deeltjes homogeen over alle richtingen zijn verdeeld.

10. Registratie van waarneming

De eenvoudigste vorm van registreren geschiedt door de experimentator zelf die getallen afleest van een telwerk of die meterstanden noteert. Dit proces heeft het belangrijke voordeel dat de experimentator werkelijk iedere waarneming ziet en dus ook kritisch kan beschouwen. Het proces is echter vrij tijdrovend, kan fouten introduceren en is vooral bij veel metingen nogal vervelend. Bovendien laat het geen snelle variatie van de te meten grootheid met de tijd toe (zie ook Squires Hfdst. 10 en 11)

Voor niet te snel varierende grootheden geschiedt registratie veelal door de waar te nemen grootheid om te zetten in een elektrische spanning welke dan weer wordt toegevoerd aan een automatische penschrijver. Men kan een dergelijk signaal dan registreren als funktie van de tijd (xt-schrijver) of als funktie van een ander signaal (xy-schrijver). De voordelen zijn vele. De waarnemer behoeft zijn metingen niet nog eens in grafiek te brengen en overziet in één oogopslag een grote hoeveelheid informatie. Variaties die hij door het doen van een beperkt aantal metingen over het hoofd zou kunnen zien, vallen duidelijk op.

Snel fluktuerende signalen kunnen, wederom na omzetting in een elektrische spanning, worden toegevoerd aan een oscilloskoop. Het vastleggen van de gebeurtenis kan gebeuren met behulp van een Polaroid-kamera of ook door gebruik te maken van een zg. storage oscilloskoop, die het verloop van het signaal in een elektronisch 'geheugen' kan opslaan. Gaat het om een vaak terugkerend signaal, dan kan de experimentator de gegevens die hij wil hebben ook bij een gewone oscilloskoop direkt van het beeldscherm afmeten.

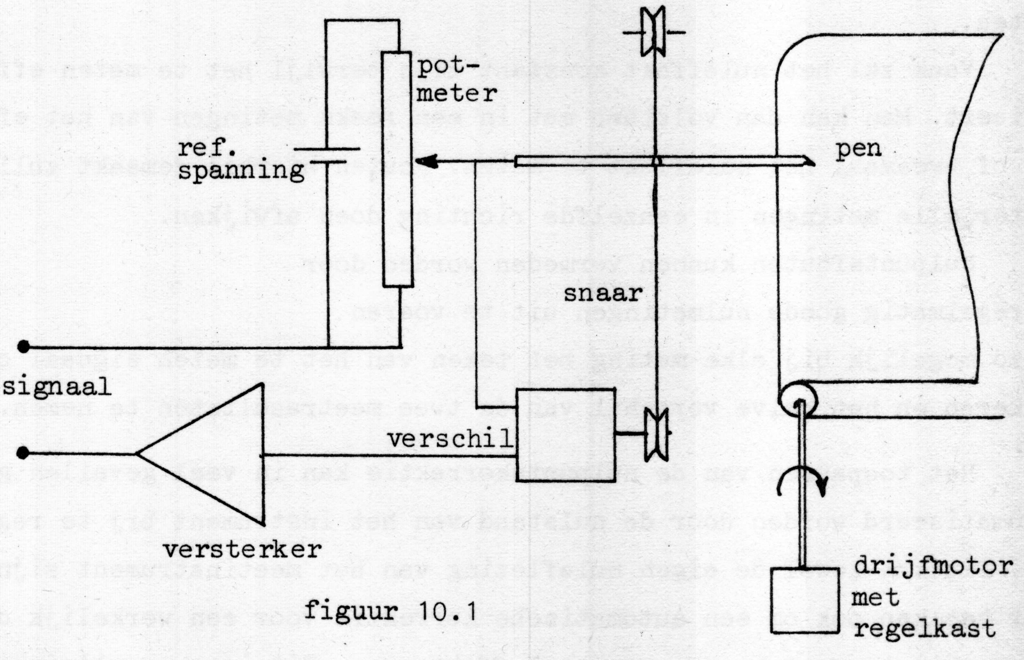
Voor grotere nauwkeurigheid of voor de computer bestemde informatie moet het signaal eerst omgezet worden in digitale vorm. Daarna kan het zonodig via de geschikte omvormers toegevoerd worden aan een drukker of aan een ponsmachine die papierband of kaarten vervaardigt. Deze gegevens kunnen dan indien gewenst aan een computer of magneetband worden toegevoerd voor verdere verwerking.

Bij een zeer vergaande automatisering wordt de uitkomst van de meting direkt aan een computer toegevoerd die reeds aanvangt met de analyse en afhankelijkheid van de uitkomst het verdere verloop van het experiment bepaalt.

Bij iedere vorm van automatisering dreigt het gevaar dat de experimentator het direkte kontakt met het meetproces verliest en dat hij daardoor pas later minder goed werkende apparatuur opmerkt met het gevolg dat er gedurende kortere of langere tijd onzinnige uitkomsten automatisch worden verwerkt. De tijd die hij vrij krijgt door de automatisering zal hij dus voor een deel weer moeten besteden aan extra kontroles op apparatuur en meetproces.

10. De potentiometer-schrijver

Om een elektrische spanning om te zetten in een verplaatsing van een pen kan men geen gebruik maken van bijvoorbeeld het principe van de draaispoelmeter. Op de pen zal immers een nogal wisselende wrijvingskracht werken, zodat hierdoor een zeer onbetrouwbare uitslag zou worden verkregen. Men maakt hier gebruik van het servobeginsel (Squires 6.8). Het principeschema van een schrijver die spanningen als funktie van tijd registreert (xt schrijver) wordt gegeven in figuur 10.1.



figuur 10.1

Bij de xy schrijver is ook een penaandrijving met servobediening in de andere richting opgenomen. De drijfmotor kan worden weggelaten.

11. Enkele veel voorkomende systematische fouten

Systematische fouten treden op in vele vormen en variaties. Een volledige behandeling zou een volledige behandeling van alle soorten meetmethoden en meetinstrumenten vragen. We beperken ons daarom tot het noemen van enkele veel voorkomende typen.
(zie ook Squires o.m. 2.2 en 2.3)

11.1 Nulpuntsfout

De meting van een fysisch verschijnsel bestaat eigenlijk uit de meting van een fysische grootheid bij aanwezigheid van het verschijnsel, vergeleken met dezelfde grootheid bij afwezigheid van het verschijnsel. Fouten die voorkomen uit de laatst genoemde meting noemen we nulpuntsfouten.

Vaak zal het nuleffekt konstant zijn terwijl het te meten effekt varieert. Men kan dan volstaan met in een reeks metingen van het effekt een of tweemaal het nuleffekt te meten. Fouten hierbij gemaakt zullen echter alle metingen in eenzelfde richting doen afwijken.

Nulpuntsfouten kunnen vermeden worden door

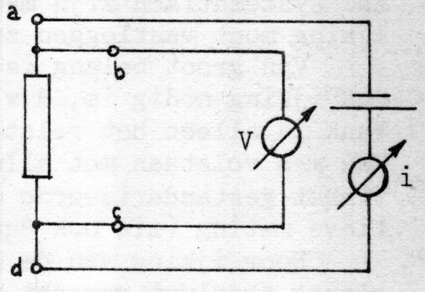
a. regelmatig goede nulmetingen uit te voeren
b. zo mogelijk bij elke meting het teken van het te meten signaal om te keren en het halve verschil van de twee meetresultaten te nemen.

Het toepassen van de nulpuntskorrektie kan in veel gevallen geautomatiseerd worden door de nulstand van het instrument bij te regelen. Dit kan zowel de eigen nulaflezing van het meetinstrument zijn, maar het kan ook om een automatische korrektie voor een werkelijk door het meetinstrument waargenomen nuleffekt gaan. Dit is geen elimineren van de nulpuntsfout maar alleen een besparing van rekenwerk bij het toepassen van de nulpuntskorrektie.

11.1 Vierpuntsmethode bij weerstandsmeting

Bij de meting van een lage weerstandswaarde zal men ernstige hinder kunnen ondervinden van de weerstand van toevoerdraden en aansluitpunten. Ook bij het gebruik van de weerstandsthermometer, waar de toevoerdraden vaak lang moeten zijn, treedt dit effekt op. Men gebruikt dan wel de vierpuntsmethode (zie ook Squires 6.2.b en 7.1.c). De schakeling is gegeven in figuur 11.1.1.

De aansluitweerstanden bij a en d en de draden daar naar toe hebben geen invloed omdat de spanning daarover niet wordt meegemeten. Aansluitdraden- en punten b en c hebben geen invloed omdat een spanningsmeting praktisch geen stroom gebruikt.



figuur 11.1.1

Achtergrondeffekt bij stralingsmeting

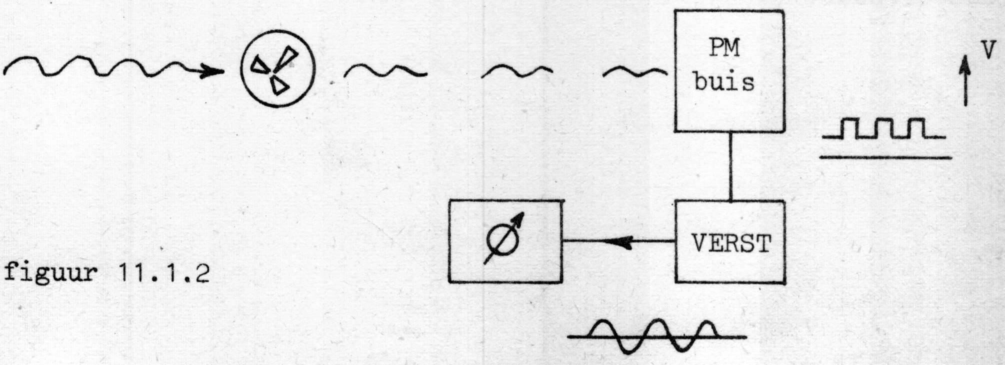
Iemand die de sterkte van de radioaktieve straling afkomstig van een bepaalde bron zal willen bepalen, zal zijn meetresultaat moeten korrigeren voor achtergrondstraling (kosmische straling bijvoorbeeld).
Is de intensiteit die hij met bron meet gelijk S en zonder bron A, dan gaat het hem om S-A. Hij zal zijn totale meettijd T zo efficiënt mogelijk over meting van S en van A moeten verdelen. De uit de eigenschappen van de Poisson-verdeling betrekkelijk eenvoudig af te leiden regel hiervoor is, dat hij dit moet verdelen in de verhouding $\sqrt{S} / \sqrt{A}$. Om eventuele verandering van A in de gaten te houden zal hij afwisselend enige tijd aan S-meting en een (dus kortere) tijd aan A-meting besteden. Hier is een duidelijk voorbeeld van een geval waar minder tijd aan de nulmeting mag worden besteed dan aan de eigenlijke meting. Te weinig tijd vergroot echter de fout. Zie ook Squires 6.2.b.

Het omkeren van het signaal om nulpuntsfouten te vermijden:

- Meting van gravitatiekonstante met torsiebalans.
- Meting van magneetveld met Hall-plaatje.

Automatische nulpuntskorrektie door signaalmodulatie

Een multiplikatorbuis zal ook bij volledige duisternis nog een kleine stroom voeren. Bovendien zal bij een experiment waar zwakke lichtintensiteiten worden gemeten mogelijk strooilicht uit de omgeving een rol spelen. Om deze variërende effekten te elimineren maakt men wel gebruik van de volgende methode. Het te meten licht wordt periodiek onderschept door een sektorschijf. Het signaal dat de multiplikatorbuis afgeeft zal dan bestaan uit een kontinue achtergrond met daarop gesuperponeerd een wisselsignaal waar het hem omgaat. Een versterker die slechts signalen van een bepaalde frekwentie doorlaat, zal het achtergrondeffekt automatisch elimineren. (Figuur 11.1.2).



figuur 11.1.2

11.2 IJkfouten

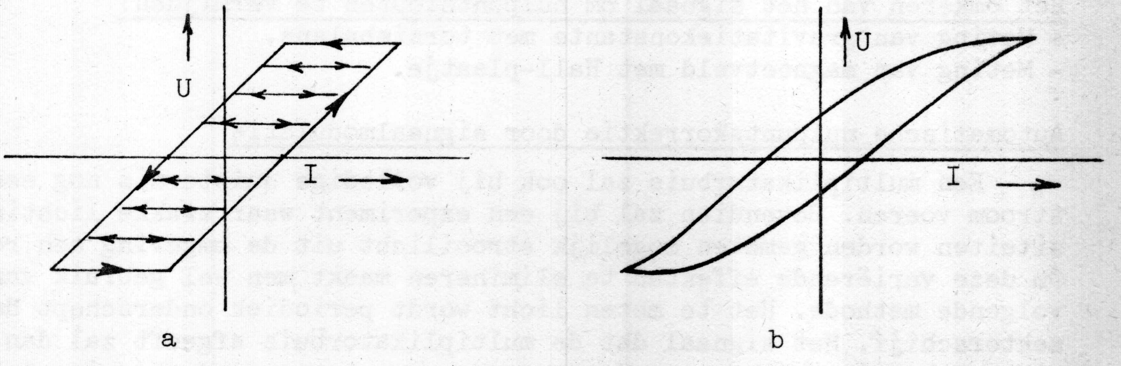
Bij het doen van een absolute meting zal de experimentator moeten vertrouwen op de ijking van zijn meetinstrument. Een afwijking daarin zal systematisch zijn meetresultaat beïnvloeden. Een meting die die ijking moet vastleggen zal met extra veel zorg moeten gebeuren.

Van groot belang is het te beseffen voor welke te meten grootheden een ijking nodig is, d.w.z. waar van de ijking wordt gebruik gemaakt. Vaak is alleen het relatieve gedrag van een grootheid van belang en kan men volstaan met alle metingen te vergelijken met voor dat experiment gestandariseerde omstandigheden. Men spreekt dan van een relatieve meting (zie ook Squires 8.8).

Door ijking van de gestandariseerde waarde kan de gehele meting alsnog absoluut gemaakt worden. Vaak zal echter de onnauwkeurigheid van de ijking zo'n nadelige invloed uitoefenen op de totale nauwkeurigheid dat bijvoorbeeld kleine variaties in het gedrag van de onderzochte grootheid schijbaar verloren gaan. Bij het opgeven van de fout in de resultaten moet men in zo'n geval de bijdrage van toevallige fouten en van systematische fouten apart opgeven.

11.3 Hysterese

Men spreekt van hysterese als de aanwijzing van het meetinstrument afhankelijk is van de onmiddellijke voorgeschiedenis van het instrument. Men ziet dit vooral optreden bij instrumenten waar wrijving een rol speelt (dode slag) of bij gebruikmaking van een sterk variabel magneetveld verkregen met behulp van een ferromagnetische stof. Figuur 11.3 geeft voor deze twee gevallen het verband tussen aanwijzing U en signaal I.



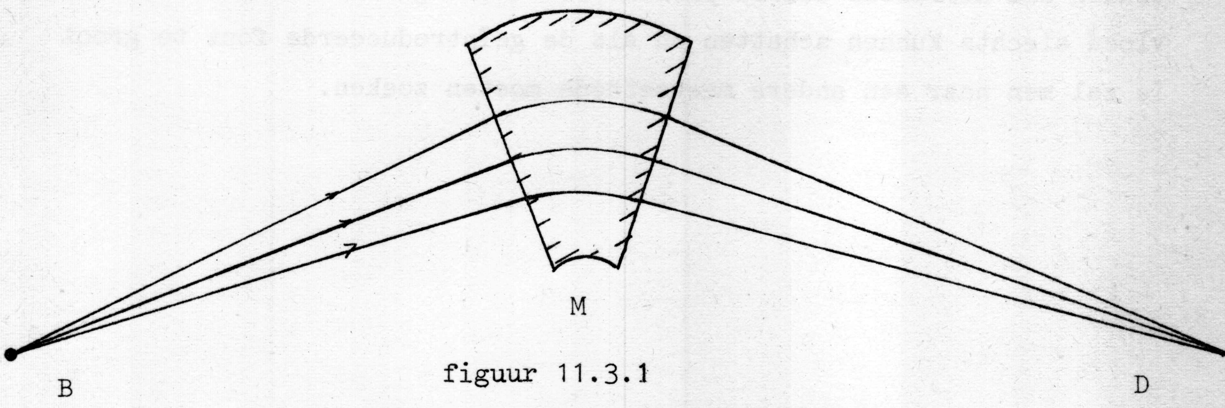
dode slag figuur 11.3 magnetische hysterese

Het altijd op dezelfde wijze een bepaalde instelling bereiken elimineert de fout niet, maar maakt de aanwijzing ten minste reproduceerbaar.

11.2 - Relatieve meting (ook Squires 8.8)

Bij de meting van de vervaltijd van een radioaktief isotoop wordt de stralingsintensiteit gemeten als funktie van de tijd. De stralingsintensiteit is alleen relatief van belang, zodat detektierendement en hoeveelheid aanwezig isotoop niet bekend behoeven te zijn. De tijdmeting zal men wel absoluut willen hebben. Het tijdmeetinstrument moet dus absoluut geijkt zijn.

11.3 -Magnetische spektrometer



figuur 11.3.1

In figuur 11.3.1 is M een elektromagneet (veld loodrecht papier), B een bron van geladen deeltjes, D een detektor (bijv. fotografische plaat). De plaats waar D wordt getroffen door de deeltjes is bepalend voor hun impuls, dus voor hun energie en/of massa. De ijking van impuls naar plaats is afhankelijk van de sterkte van het magneetveld en dus van de magneetstroom. De energie-bepaling wordt dus ernstig beïnvloed door hysterese van de magneet. Een vaste procedure om een instelling te bereiken moet zowel bij ijking met deeltjes met bekende impuls als bij de meting worden toegepast. Een veel betere methode is het echter het magnetisch veld direkt te meten en de stroom door de magneetspoelen alleen als regeling te gebruiken.

- dodegang

Tikken op een wijzerinstrument maakt het effekt kleiner. Als klein voordeel krijgt men snel informatie over de laatste bewegingsrichting (barometer).

11.4 Paralaxfout Zie Squires 6.2

11.5 Verloop Zie Squires 8.5

11.6 De invloed van het meetinstrument op de te meten grootheid

Omdat een meetinstrument direkt gebruik maakt van het fysisch verschijnsel dat het moet meten zal het daar in veel gevallen zelf ook invloed op hebben. Soms kan het permanent aangesloten houden van het instrument de bezwaren hiervan wegnemen, soms is het betrekkelijk eenvoudig een korrektie toe te passen. In andere gevallen zal men de invloed slechts kunnen schatten en als de geïntroduceerde fout te groot is zal men naar een andere meetmethode moeten zoeken.

11.6 Stroommeting met draaispoelmeter

Een draaispoelmeter heeft zelf een eindige weerstand, die invloed zal hebben op de te meten stroom. De grootte van die invloed wordt bepaald door de verhouding tussen de weerstand van de meter en de andere weerstanden in het circuit. De hinder is dus zo klein mogelijk als de eigenweerstand van de meter zo klein mogelijk is.

Dit effekt heeft niet tot gevolg dat men onjuist meet. De fout maakt men pas bij het gebruiken van de waarde die gemeten werd met de meter in het circuit voor een geval waar er geen meter in het circuit is.

De invloed van de ionisatiemanometer op de druk

De ionisatiemanometer maakt gebruik van de meting van een ionenstroom die ontstaat door plaatselijke ionisatie van het gas waarvan de druk moet worden gemeten. Omdat een gedeelte van de geioniseerde atomen zal blijven geabsorbeerd aan de negatieve kollektor wordt er door deze meting dus voortdurend gas aan het systeem onttrokken, hetgeen een verlaging van de druk tot gevolg zal hebben.
Omdat het er in veel gevallen om gaat de druk in een systeem zo laag mogelijk te krijgen is dit meestal een gunstig effekt. De meter zal als meter echter fout gaan aanwijzen als er te veel gas aan de kollektor wordt geabsorbeerd omdat hierdoor de ijking wordt beinvloed. Uitstoken van de kollektor kan dit weer verhelpen.

11.7 Het vermijden van systematische fouten

11.7.1 Er zijn drie krachtige methoden om systematische fouten te ontdekken. Kortgezegd:

Herhalen
Varieren
Verwisselen

In het algemeen zou men iedere meting vele malen *met een steeds geheel andere meetmethode* moeten herhalen en onder geheel andere omstandigheden. In de praktijk is dit bijna nooit mogelijk. Alles wat gedaan kan worden in die richting is echter de moeite waard.

11.7.2 Gewone herhalingen van de meting geven een indruk van de reproduceerbaarheid, d.w.z. van de toevallige fout, maar brengen ook verloop aan de dag.

11.7.3 Wordt een grootheid geacht onafhankelijk te zijn van bepaalde parameters die nauw bij het experiment zijn betrokken, of is de afhankelijkheid bekend, dan levert variatie van die parameter een belangrijke kontrole op voor de juistheid van die veronderstelling. Vaak kan men door extrapolatie van de meting een resultaat verkrijgen voor een waarde van de parameter die men zou willen hebben, maar die technisch niet bereikbaar is.

11.7.4 Wanneer in een opstelling op verschillende plaatsen dezelfde instrumenten voorkomen, behoort onderlinge verwisseling geen invloed te hebben op de uitkomst. Het werkelijke uitvoeren van die verwisseling is zeer de moeite waard. Zelfs het vervangen van een instrument dooreen ander soortgelijk instrument kan vaak een meetfout aan het licht brengen.

11.7.5 Tenslotte zijn het a) een voortdurend op de hoede zijn, b) een konstante argwaan tegen zijn eigen meetresultaten en c) zijn gevoel voor het experimenteren, die de experimentator later de moed zullen moeten schenken om te beweren dat hij denkt alle systematische fouten te kennen.

11.7 Zie ook Squires 7.1 en 8.1 en volgende

11.7.2 Verloop of drift is eigenlijk een speciaal geval van 11.7.3. Een grootheid die verondersteld wordt tijdsonafhankelijk te zijn, blijkt wel een tijdsafhankelijkheid te vertonen. Het heeft weinig zin verder te meten tot de oorzaak daarvan is opgespoord. Er moet immers een volledig onjuiste veronderstelling over het experiment zijn gemaakt.

- Als tijdens een weerstandsmeting de weerstandswaarde verandert, betekent dit dat de meetstroom de temperatuur van de weerstand beïnvloed. Extrapoleer dan naar lage meetstromen om de waarde bij kamertemperatuur te vinden.

11.7.3-Wie een slingertijd wil meten bij uitslag nul kan het beste bij verschillende uitslagen meten en naar nul extrapoleren.

12. Keuze van de meetmethode

In bijna alle gevallen heeft men voor de meting van een bepaalde grootheid de keus uit een aantal meetmethoden. De keus zal bepaald worden door onder meer de volgende faktoren:

a) Gebied van toepassing (grootte orde van de te meten grootheid).
b) Meetnauwkeurigheid (scheidend vermogen)
c) Kosten
d) Responsietijd
e) Beschikbaarheid binnen redelijke termijn
f) Handigheid in gebruik

Het is de opgave voor de experimentator om die meetmethode te kiezen die het beste kompromis vormt tussen alle eisen die zijn speciaal geval stelt.

12. - <u>Meting van lage gasdrukken</u>

Een zeer duidelijk voorbeeld van een grootheid waarvoor een grote variëteit van meetinstrumenten bestaat, alle geschikt voor slechts een beperkt drukgebied. Hoewel de officiële eenheid voor druk de N/m^2 is, ook wel pascal genoemd, komt men tegen de atm (1,013 10^5 N/m^2) de atm (0,98 x 10^5 N/m^2), de bar (10^5 N/m^2)en de torr (= 1 cm kwikdruk = = 133,3 N/m^2). Vooral de torr wordt in het lagedrukgebied veel gebruikt. We geven enkele groepen meetinstrumenten met hun werkgebied (torr).

Meetmethode 10^3 2 1 0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9

Mechanisch (elektrische vervorming) ....
Vloeistofniveau (direkt) ....
Vloeistofniveau (na kompressie) ....
Warmtegeleiding (temperatuurverandering van weerstandsdraad) ....
Ionisatie van gas (diverse variaties) ....→

Omdat men voor het bereiken van een lage druk altijd het gehele gebied vanaf 760 torr omlaag moet doorlopen heeft men aan een vakuum opstelling meestal meerdere drukmeters. Men dient dan de te onderscheiden gebieden waar men echt de druk wil meten, of waar men alleen een indikatie nodig heeft om te weten of de druk laag genoeg is om een bepaald experiment te doen, of om over te schakelen naar een ander meetinstrument of pompsysteem.

- <u>Lengte</u> Zie Squires par. 6.1 t/m 6.5.

december 1972

Tentamens Meten in de fysika I

Data

Voor de groep studenten die het a-praktikum reeds volgt: donderdag 1 februari 14.30 uur.

Voor de groep studenten die het a-praktikum in het 2e semester gaat volgen: dinsdag 27 februari 14.30 uur.

Herkansing voor beide groepen: vrijdag 23 maart 11.15 - 12.45 uur en donderdag 20 september 14.00 uur.

Tentamenstof:

Verwerking van waarnemingen (Squires deel I)

Kennis van de volgende begrippen en toepassingen daarvan op een fysisch voorbeeld (geen theoretische afleidingen): verdelingsfunktie (o.a. Gauss-funktie); gemiddelde; standaardafwijking; middelbare fout; middelbare fout in het gemiddelde; voortplanting van fouten in funkties (speciaal som en produkt, maar ook algemeen); principe kleinste kwadratenmethode (geen formules daarvan).

Algemene meetbeginselen

De algemene beschouwingen over het meten in de fysika en de voorbeelden die daarbij ter toelichting op het kollege zijn behandeld voor zover deze zijn beschreven in de syllabus (par. 2 t/m 11) of in Squires hoofdstuk 6, 8 en 9.

Errata syllabus 1972

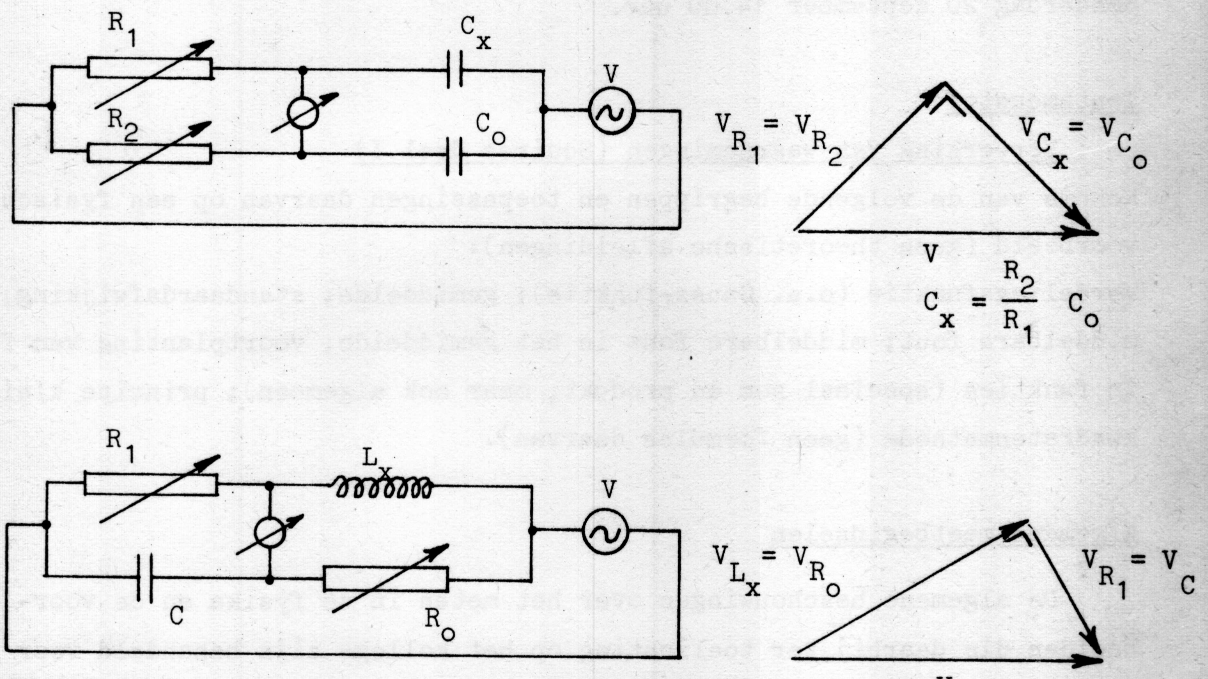
Pag. 8b regel 20 korte → snel variërende

25 sterkingsfaktor (A)

29 $$V_u/V_i = \frac{R_2}{R_1}\left\{\frac{1}{-1+\frac{1}{A}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)}\right\} \simeq -R_2/R_1$$

Pag. 10a fig. 6.1 rechts onder: niet → net

Figuur 7.2 wordt:



$$C_x = \frac{R_2}{R_1}\, C_o$$

Figuur 7.2

Wien en Maxwell-brugschakeling met fasediagrammen bij evenwicht.

$$L_x = R_1 R_o C$$

Pag. 14b drijfmotor → aandrijfmotor

Pag. 19b 5e regel laatste woord: atm → at

6e regel: torr (= 1 mm kwikdruk)

10e regel: elektrische → elastische

9e regel toevoegen: druk in torr

120
110
100